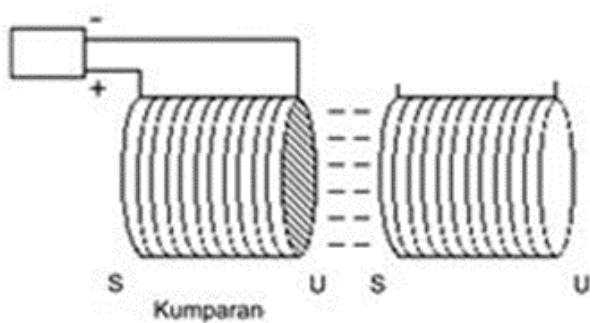




ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Αντισεισμική μόνωση με χρήση ηλεκτρομαγνητικών
δυνάμεων



Ψυλάκης Ηλίας

Επιβλέπων: Γ. Σταυρουλάκης

Χανιά 2017

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ πολύ όλους όσους – με την πολύτιμη βοήθειά τους – συνετέλεσαν ώστε να διεκπεραιωθεί η μεταπτυχιακή αυτή διατριβή και ιδιαίτερα τον επιβλέπων καθηγητή Γεώργιο Σταυρουλάκη. Ευχαριστώ ειδικότερα την Κ. Καλλιόπη Καλατζάκη για την βοήθειά της στον κώδικα και την Κ. Λιλή Μαρία για την συνολική της προσφορά.

Imagination is more important than knowledge

Η φαντασία είναι σημαντικότερη από τη γνώση

Albert Einstein

Περίληψη

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής πραγματοποιήθηκε μελέτη αντισεισμικής μόνωσης με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων. Συγκεκριμένα εξετάστηκε κατά πόσο είναι δυνατόν να γίνει απόσβεση των δυνάμεων ταλάντωσης που προκαλούνται από σεισμό μέσω μιας διάταξης ηλεκτρομαγνητών που επιδρούν στην κατασκευή.

Στο Κεφάλαιο 1, έγινε μια γενική αναφορά στο φαινόμενο του σεισμού και στις δυνάμεις που επιδρούν σε μια κατασκευή κατά τη διάρκεια του. Στο Κεφάλαιο 2 έγινε περιγραφή του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, βάσει του οποίου στηρίχθηκε η βασική ιδέα προκειμένου να αξιοποιηθεί και να χρησιμοποιηθεί ως αντισεισμική μόνωση. Ειδικότερα μελετήθηκε με μαθηματικούς τύπους η μαγνητική αλληλεπίδραση καταλήγοντας σε μια μαθηματική εξίσωση η οποία υπολογίζει την μαγνητική δύναμη ανάμεσα σε δύο μαγνητικούς πόλους. Η εξίσωση αυτή χρησιμοποιήθηκε στην γραμμική της μορφή στο κυρίως θέμα της διατριβής αυτής, μέσω της οποίας προέκυψαν τα αποτελέσματα.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάστηκε η θεωρία των δυναμικών συστημάτων με μαθηματικές σχέσεις χρήσιμες για την προσέγγιση της λύσης του προβλήματος. Συγκεκριμένα αναφέρονται η θεωρία της περιοδικής διέγερσης με δυνάμεις απόσβεσης, η ιδιοσυχνότητα καθώς επίσης και η μοντελοποίηση ενός μονοβάθμιου δυναμικού συστήματος. Ανάγοντας την κατασκευή σε ένα μονοβάθμιο δυναμικό σύστημα, στο κεφάλαιο 4 έγινε αναλυτική και σχηματική περιγραφή του ηλεκτρομαγνητικού συστήματος.

Στο κεφάλαιο 5, με την βοήθεια της MATLAB εισήχθηκαν αρχικά δεδομένα υποβάλλοντας την κατασκευή σε μια συγκεκριμένη διέγερση· προέκυψε μια γραφική παράσταση μετατόπισης - ιδιοσυχνότητας. Το επόμενο βήμα ήταν να προσαρμοστεί η ηλεκτρομαγνητική δύναμη στο σύστημα και να προκύψει ένα ίδιο διάγραμμα. Συγκρίθηκαν τα δύο διαγράμματα και φάνηκε ότι στο δεύτερο η μετατόπιση ήταν εμφανώς μειωμένη. Εν κατακλείδι γίναν 4 παραδείγματα με αλλαγή στα δεδομένα του κώδικα ώστε να σχολιαστούν οι μετατροπές και να προκύψουν τα συμπεράσματα.

Τέλος, βάσει των αποτελεσμάτων της ανάλυσης αυτής, προέκυψαν τα συμπεράσματα και κυρίως εάν είναι εφικτή η υλοποίηση της αρχικής ιδέας και ποιες είναι οι μελλοντικές προτάσεις και βλέψεις επί του θέματος. Με τις αλλαγές στα αρχικά δεδομένα του κώδικα διαπιστώθηκε ότι θεωρητικά μια τέτοια ιδέα απόσβεσης των δυνάμεων του σεισμού με χρήση ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων μπορεί να πραγματοποιηθεί όμως σε ένα τέτοιο πρώιμο στάδιο είναι αδύνατον να αποσαφηνιστεί εάν μπορεί να εφαρμοστεί στην πραγματικότητα.

Abstract

By this master thesis presents an anti-seismic insulation study using electromagnetic forces. Specifically it was examined whether it is possible for the vibration forces to be damped through an array of electromagnets within the foundation of the construction.

In Chapter 1, an overall reference to the earthquake phenomenon and to the forces that impact on a construction during its action. In Chapter 2, the phenomenon of electromagnetic induction was described, on which the main idea was based on, in order to be fully utilized as anti-seismic insulation. In particular, the magnetic interaction was studied using mathematical formulas, resulting in a mathematical equation which calculates the magnetic force between two magnetic poles. This equation was used in its linear form in the main subject of this thesis, through which the results were obtained.

In Chapter 3, the theory of dynamic systems was presented using mathematical relationships useful to approach the solution to the problem. Specifically, the theory of periodic stimulation with damping forces, self-frequency as well as the modeling of an one-stage dynamic system were mentioned. In Chapter 4, there was a detailed and schematic description of the electromagnetic system, assuming the construction as an one-stage dynamic system.

In Chapter 5, initial data was introduced by subjecting the construction to a specific stimulation; a graphical representation of displacement- self-frequency was produced, using Matlab. The next step was to adapt the electromagnetic force to the system and to produce a same diagram. The two graphs were compared and the displacement was apparently reduced in the second graph. In conclusion, four examples were developed, changing the data of the code in order to comment on the conversions and to led to the conclusions.

Finally, on the basis of the results of this analysis, it was emerged whether the main idea could be realized and what the future proposals are. The results showed that theoretically such an idea of damping the forces of an earthquake using electromagnetic forces can be realized but at such an early stage it is impossible to clarify whether it can be implemented in reality.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 1	2
1.1 Το φαινόμενο του σεισμού	2
1.2 Δυνάμεις που ασκούνται σε μια κατασκευή κατά τη διάρκεια σεισμού	3
Κεφάλαιο 2.....	5
2.1 Ηλεκτρομαγνητισμός.....	5
2.2 Μαγνητικό πεδίο	6
2.3 Μαγνητική αλληλεπίδραση.....	7
2.4 Γραμμική εξίσωση μαγνητικής δύναμης.....	10
Κεφάλαιο 3.....	11
3.1 Δυναμικό σύστημα.....	11
3.2 Ταλάντωση	12
3.3 Εξαναγκασμένη κίνηση – περιοδική διέγερση με δυνάμεις απόσβεσης.....	13
3.4 Ιδιοσυχνότητα	16
3.5 Μοντελοποίηση δυναμικού μονοβάθμιου συστήματος	17
Κεφάλαιο 4.....	19
4.1 Περιγραφή ηλεκτρομαγνητικού συστήματος	19
4.2 Μοντελοποίηση του συστήματος	20
Κεφάλαιο 5.....	21
5.1 Matlab	21
5.2 Ταλάντωση χωρίς τη χρήση ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων	22
5.3 Ταλάντωση με χρήση ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων	25
5.4 Παραδείγματα με αλλαγή δεδομένων του ηλεκτρομαγνητικού συστήματος....	29
Συμπεράσματα.....	34
Βιβλιογραφία	35
Παράρτημα Α.....	36

Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1. Οι τεκτονικές πλάκες της γης και η κατεύθυνσή τους.....	2
Σχήμα 2. Οι κατασκευές, καθώς συνδέονται με το έδαφος (μέσω της θεμελίωσής τους) με λιγότερο ή περισσότερο απαραμόρφωτη σχέση αναπόφευκτα ανταποκρίνονται στις σεισμικές μετακινήσεις του	3
Σχήμα 3. Την ώρα που το ανώτερο τμήμα της εύκαμπτης αυτής κατασκευής μετακινείται με υστέρηση, υπακούοντας στην αρχική μετακίνηση του εδάφους, το έδαφος ήδη αναστρέφει τη μετακίνησή του.....	4
Σχήμα 4. Οριζόντιες και κατακόρυφες συνιστώσες σεισμικών φορτίων.	4
Σχήμα 5.	7
Σχήμα 6. Περιβάλλον της MATLAB με τις εντολές και το αποτέλεσμα	10
Σχήμα 7. Μοντελοποίηση δυναμικών συστημάτων	11
Σχήμα 8. Πλαίσιο	17
Σχήμα 9. Μοντελοποίηση δυναμικού συστήματος με ένα βαθμό ελευθερίας	17
Σχήμα 10. Πλαίσιο με ηλεκτρομαγνητικό σύστημα	19
Σχήμα 11. Μοντελοποίηση του δυναμικού συστήματος με το ηλεκτρομαγνητικό σύστημα	20
Σχήμα 12. Το περιβάλλον της Matlab-αρχική σελίδα	22
Σχήμα 13. Εντολές στη Matlab.....	22
Σχήμα 14. Εντολές στη Matlab.....	23
Σχήμα 15. Εντολές στη Matlab.....	23
Σχήμα 16. Εντολές στη Matlab.....	23
Σχήμα 17. Εντολές στη Matlab.....	24
Σχήμα 18. Γραφική παράσταση στη MATLAB	24
Σχήμα 19. Εντολές στη Matlab.....	25
Σχήμα 20. Εντολές στη Matlab	25
Σχήμα 21. Εντολές στη Matlab.....	25
Σχήμα 22. Εντολές στη Matlab	26
Σχήμα 23. Εντολές στη Matlab	26
Σχήμα 24. Γραφική παράσταση στη Matlab	27
Σχήμα 25. Εντολές στη Matlab	27
Σχήμα 26. Γραφική παράσταση στη Matlab	28
Σχήμα 27. Εντολές στη Matlab	29
Σχήμα 28. Γραφική παράσταση στη Matlab	30
Σχήμα 29. Εντολές στη Matlab	30
Σχήμα 30. Γραφική παράσταση στη Matlab	31
Σχήμα 31. Εντολές στη Matlab.....	31
Σχήμα 32. Γραφική παράσταση στη Matlab	32
Σχήμα 33. Εντολές στη Matlab	32
Σχήμα 34. Γραφική παράσταση στη Matlab	33

Εισαγωγή

Ο σεισμός, ένα αναπόφευκτο φυσικό φαινόμενο, είναι αντικείμενο μελέτης πολλών χρόνων για την επιστήμη. Στον τομέα της κατασκευής, καταβάλλονται αξιόλογες προσπάθειες για την μελέτη και την εφαρμογή αντισεισμικών μονώσεων. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα-θαύματα της μηχανικής τα οποία προσπαθούν και καταφέρνουν να κάνουν σημαντική απόσβεση των δυνάμεων ταλάντωσης του σεισμού. Η τάση της επιστήμης είναι να βρει τρόπο ώστε να γίνει πλήρης απόσβεση αυτών των δυνάμεων. Μπορεί άραγε να υλοποιηθεί μελλοντικά? Και κατά πόσο μια θεωρία περί τούτου μπορεί να ανταπεξέλθει υπό πραγματικές συνθήκες?

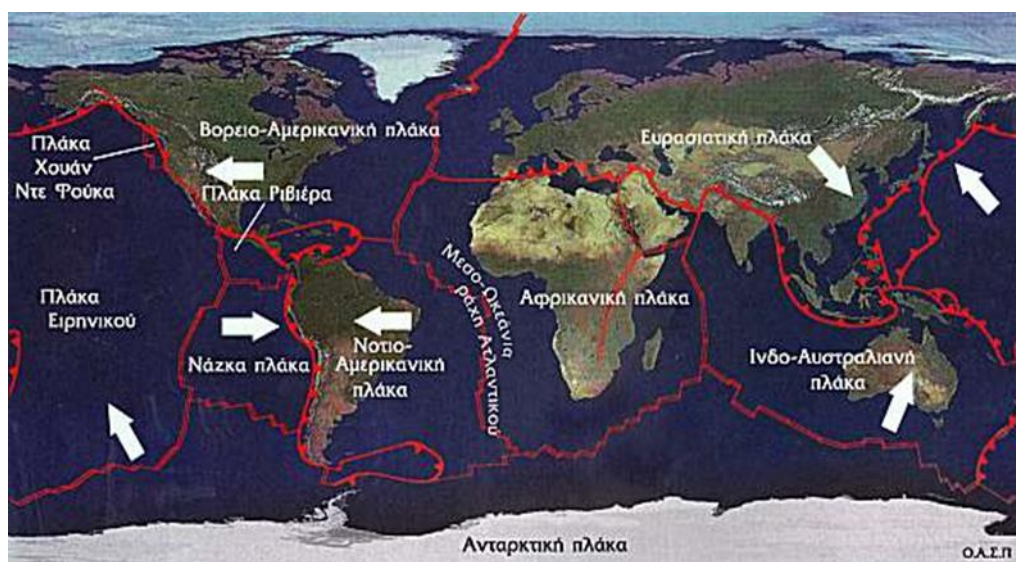
Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, παρουσιάζεται μια ιδέα απόσβεσης των δυνάμεων ταλάντωσης κατά την διάρκεια σεισμού. Αυτή η ιδέα γεννήθηκε από την αίσθηση του φόβου που προκαλεί ο σεισμός, εξελίχθηκε από την αντίδραση του φόβου και στηρίχθηκε στην επιστήμη της φυσικής και των μαθηματικών και ειδικότερα στον ηλεκτρομαγνητισμό.

Κεφάλαιο 1

1.1 Το φαινόμενο του σεισμού

Ο σεισμός είναι ένα φυσικό φαινόμενο -άρρηκτα συνδεδεμένο με τη ζωή και την ιστορία της γης- που εκδηλώνεται τις περισσότερες φορές, ξαφνικά και χωρίς προειδοποίηση. Συγκεκριμένα, είναι η εδαφική δόνηση που γεννιέται κατά τη διατάραξη της μηχανικής ισορροπίας των πετρωμάτων (Σχήμα 1) από φυσικές αιτίες που βρίσκονται στο εσωτερικό της γης.

Το τράνταγμα, η κίνηση του εδάφους που οφείλεται στη θραύση πετρωμάτων, το στιγμιαίο αποτέλεσμα μιας μακροχρόνιας διαδικασίας συσσώρευσης δυναμικής ενέργειας σε καταπονούμενες περιοχές της λιθόσφαιρας [1].



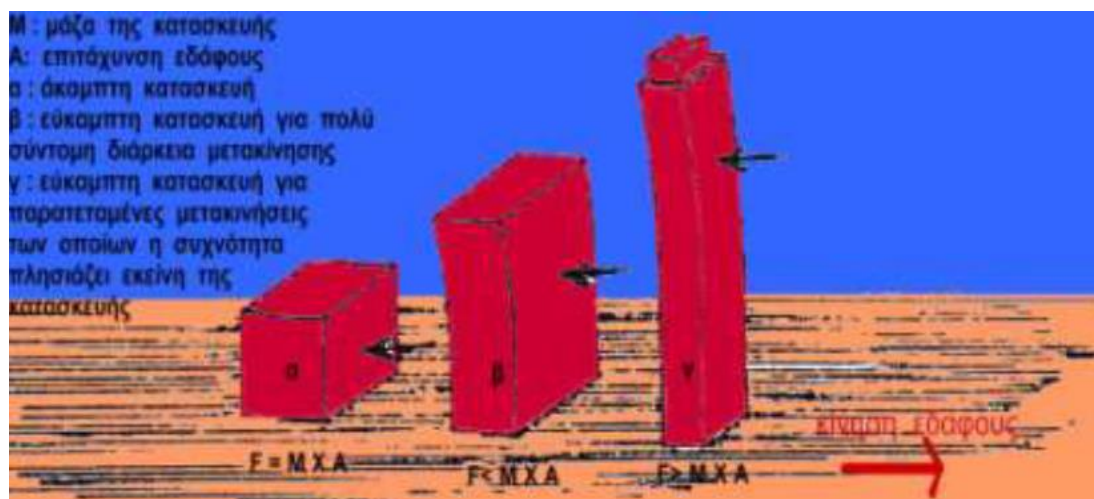
Σχήμα 1. Οι τεκτονικές πλάκες της γης και η κατεύθυνσή τους

Το μέγεθος ενός σεισμού εκφράζεται σε βαθμούς της κλίμακας Richter και είναι η φυσική ποσότητα που χρησιμοποιείται από τους σεισμολόγους για τη μέτρηση της σεισμικής ενέργειας που απελευθερώνεται στο σημείο που εκδηλώνεται ο σεισμός.

Αναφορικά στην Ελλάδα σημειώνονται κατά μέσω τον χρόνο όρο 531 σεισμοί και στην Ιαπωνία 1041 [2].

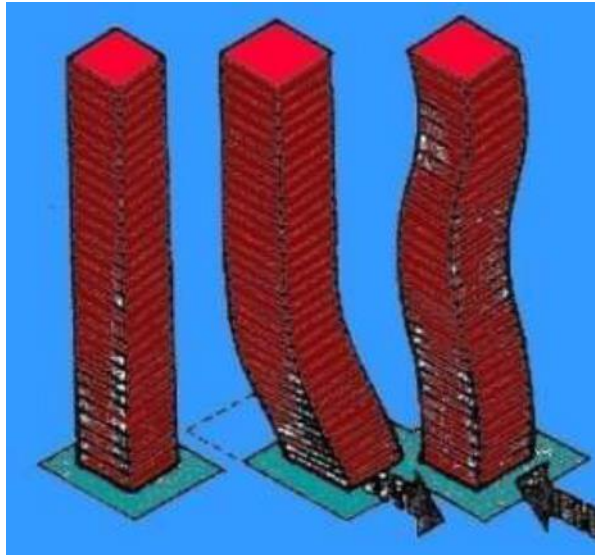
1.2 Δυνάμεις που ασκούνται σε μια κατασκευή κατά τη διάρκεια σεισμού

Οι μεγάλης έντασης σεισμοί προκαλούν βίαιες δονήσεις με ταυτόχρονες συνιστώσες σε οριζόντιες και κατακόρυφες διευθύνσεις, οι οποίες έχουν ως επακόλουθο την εντελώς σύνθετη και απρόβλεπτη κίνηση και παραμόρφωση του εδάφους. Αυτού του είδους οι διαταραχές του εδάφους από την έκλυση της σεισμικής ενέργειας, έχει ως αποτέλεσμα την άσκηση δυνάμεων, την ανάπτυξη τάσεων και παραμορφώσεων σε οποιοδήποτε κτίσμα βρίσκεται πάνω σε αυτό.



Σχήμα 2. Οι κατασκευές, καθώς συνδέονται με το έδαφος (μέσω της θεμελίωσής τους) με λιγότερο ή περισσότερο απαραμόρφωτη σχέση αναπόφευκτα ανταποκρίνονται στις σεισμικές μετακινήσεις του

Καθώς η βάση της κατασκευής μετακινείται, μετακινούνται, με κάποια υστέρηση και οι υψηλότερες περιοχές της, υπακούοντας στην αδράνεια. Έτσι, όταν μία κατασκευή δονείται, τότε ασκούνται σε αυτήν οι λεγόμενες «αδρανειακές δυνάμεις» (inertia forces). Το μέγεθος των δυνάμεων αυτών είναι ανάλογο της μάζας της κατασκευής και μεταβάλλεται από την μία χρονική στιγμή στην άλλη, καθώς μεταβάλλεται η επιτάχυνση του ίδιου του σεισμού (δεύτερος νόμος του Νεύτωνα). Ως εκ τούτου, η κτιριακή μάζα, που άμεσα εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα του κτιρίου (τη γενική του δηλαδή αρχιτεκτονική σύνθεση), καθορίζει σε ένα σημαντικό ποσοστό τον βαθμό θετικής ή αρνητικής αντιμετώπισης των σεισμικών δυνάμεων από την ίδια την κατασκευή. Η αύξηση της μάζας της κατασκευής συνεπάγεται την επιβάρυνσή της με αυξημένα οριζόντια (Σχήμα 2) και κατακόρυφα σεισμικά φορτία σε επικείμενο σεισμό, κάτι που δίνει σαφές πλεονέκτημα στις ελαφρές (π.χ. ξύλινες, μεταλλικές) κατασκευές.



Σχήμα 3. Την ώρα που το ανώτερο τμήμα της εύκαμπτης αυτής κατασκευής μετακινείται με υστέρηση, υπακούοντας στην αρχική μετακίνηση του εδάφους, το έδαφος ήδη αναστρέφει τη μετακίνησή του.

Όταν ένα κτίριο δονείται, οι δυνάμεις αδρανείας οι οποίες ασκούνται σε κάθε μέλος της κατασκευής, είναι επίσης ανάλογες της μάζας και της επιτάχυνσης αυτού του μέλους. Για τον φέροντα οργανισμό μιας κατασκευής, βασικό ζητούμενο σε περίπτωση σεισμού είναι η μεταβίβαση των οριζόντιων δυνάμεων (Σχήμα 3), ενώ η μεταβίβαση των κατακόρυφων σεισμικών φορτίων τα οποία μπορεί να προκύψουν, συνήθως αντιμετωπίζεται σαν δευτερεύον ζήτημα. Επειδή δηλαδή ένας φέρων οργανισμός από την φύση του στήνεται για να μεταφέρει πρωταρχικά τα κατακόρυφα δικά του κινητά και ακίνητα φορτία, και ως εκ τούτου διαθέτει για τον σκοπό αυτό σημαντικές εφεδρείες, θεωρείται ότι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων θα καταφέρει να μεταβιβάσει και τα ενδεχόμενα κατακόρυφα σεισμικά φορτία χωρίς ιδιαίτερο πρόβλημα (Σχήμα 4). Οι πλάγιες ωθήσεις «εξασθενούν» σε πρώτη φάση την κατασκευή κάμπτοντας και «κόβοντας» υποστυλώματα, δοκούς και τοιχεία, ενώ στην συνέχεια η βαρύτητα «τραβάει» την αποδυναμωμένη πλέον κατασκευή προς τα κάτω [3].



Σχήμα 4. Οριζόντιες και κατακόρυφες συνιστώσες σεισμικών φορτίων.

Κεφάλαιο 2

2.1 Ηλεκτρομαγνητισμός

Ο ηλεκτρομαγνητισμός, ή ηλεκτρομαγνητική δύναμη ή ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση είναι μία από τις τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις της φυσικής που μελετά τα φαινόμενα που απορρέουν από το ηλεκτρικό φορτίο των σωματιδίων και από την αλληλεπίδραση των ηλεκτρικών με τα μαγνητικά πεδία. Η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση εμφανίζεται μεταξύ των αντικειμένων που διαθέτουν ηλεκτρικό φορτίο, τα οποία με τη σειρά τους αποτελούν τις πηγές του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Το πεδίο αυτό διαδίδεται στο χώρο με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ένα κυματικό φαινόμενο για το οποίο δεν απαιτείται η μεσολάβηση κάποιου υλικού μέσου για την διασπορά του στο κενό, και το οποίο ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός.

2.2 Μαγνητικό πεδίο

Ως μαγνητικό πεδίο ορίζεται γενικά ο χώρος μέσα στον οποίο ασκούνται μαγνητικές δυνάμεις. Το μαγνητικό πεδίο περιβάλλει το μαγνήτη και χαρακτηρίζεται ασθενές ή ισχυρό, και ομοιόμορφο ή ανομοιόμορφο, αν οι μαγνητικές γραμμές του είναι παράλληλες ή όχι. Οφείλεται σε κινούμενα ηλεκτρικά φορτία και σχηματίζεται γύρω από ρευματοφόρους αγωγούς. Αλληλεπιδρά με το ηλεκτρικό πεδίο και πηγή του είναι τα κινούμενα φορτία. Όσο πιο πυκνές είναι οι μαγνητικές γραμμές ενός πεδίου, τόσο πιο ισχυρό είναι το πεδίο. Το μέγεθος που δείχνει πόσο ισχυρό είναι το μαγνητικό πεδίο, ονομάζεται μαγνητική επαγωγή και συμβολίζεται με B και μετράται σε T (Tesla).

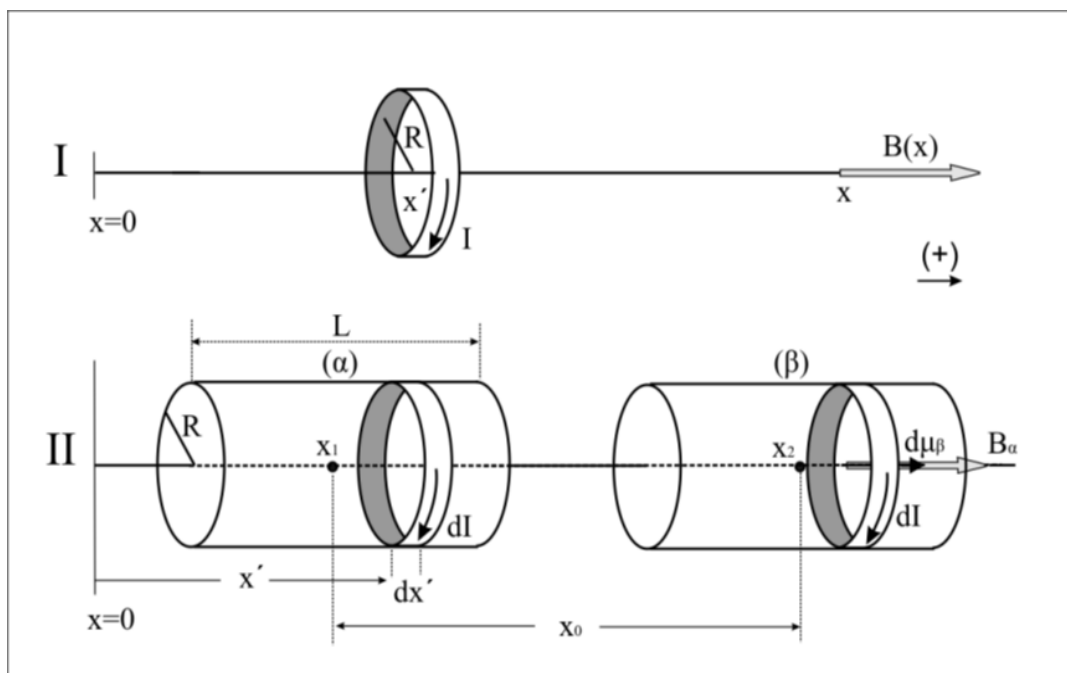
Το χαρακτηριστικό μέγεθος του μαγνητικού πεδίου είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Ένταση μαγνητικού πεδίου σ' ένα σημείο αυτού ονομάζεται η μαγνητική δύναμη που επενεργεί επί της μονάδας της βόρειας μαγνητικής μάζας όταν αυτή βρίσκεται στο σημείο αυτό του πεδίου. Η Ένταση μαγνητικού πεδίου συμβολίζεται με H και μετριέται σε Βέμπερ (W). Η μονάδα W έχει διαστάσεις έντασης ηλεκτρικού ρεύματος ανά μονάδα μήκους (A/m).

2.3 Μαγνητική αλληλεπίδραση

Η δύναμη μεταξύ δύο ραβδόμορφων μαγνητών, κατά τον άξονά τους, μπορεί να περιγραφεί ποσοτικά αν το πεδίο κάθε μαγνήτη εξομοιωθεί με το πεδίο στο εξωτερικό ενός πηνίου. Κάθε μαγνήτης μπορεί, προσεγγιστικά, να θεωρηθεί ως μια διάταξη πολύ λεπτών κυκλικών ρευματοφόρων αγωγών, που ο ένας τοποθετείται δίπλα στον άλλον, σχηματίζοντας ένα πηνίο που είναι, ουσιαστικά, η κυλινδρική επιφάνεια του μαγνήτη. Προς τούτο θεωρούμε ότι στην επιφάνεια κάθε μαγνήτη υπάρχει ένα επιφανειακό κυκλικό ρεύμα που η ένταση του ανά μονάδα μήκους του μαγνήτη συμβολίζεται με J (A / m) (Το J οφείλεται κατ' αρχήν στην κίνηση των ηλεκτρονίων και ονομάζεται επιφανειακή πυκνότητα ρεύματος μαγνήτισης). Έτσι, έχοντας αντιστοιχίσει σε έναν ραβδόμορφο μαγνήτη ένα πηνίο που διαρρέεται από ρεύμα, υπολογίζεται η ελκτική δύναμη μεταξύ δύο μαγνητών, κατά 3 τον άξονά τους. Η εξαγωγή της τελικής σχέσης γίνεται σε τρία βήματα:

Βήμα 1^ο. Θεωρούμε ένα κυκλικό αγωγό ακτίνας R που διαρρέεται από ρεύμα I . Ο άξονας xx' είναι κάθετος στο επίπεδο του αγωγού και διέρχεται από το κέντρο του κύκλου που βρίσκεται στη θέση x' (Σχήμα 5.I). Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ο αγωγός είναι το πεδίο ενός διπόλου. Με το νόμο Biot-Savart μπορούμε να υπολογίσουμε το πεδίο αυτό στο τυχαίο σημείο x του άξονα:

$$B(x) = \frac{\mu_0 I R^2}{2[(x-x')^2 + R^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$



Σχήμα 5.

Στο Σχήμα 5.II οι δύο όμοιοι μαγνήτες, (α) και (β), μήκους L και ακτίνας R , τοποθετούνται με τα κέντρα τους στα σημεία x_1 και x_2 του άξονα.

Ένας στοιχειώδης κυκλικός αγωγός του μαγνήτη (α) που βρίσκεται στη θέση x' έχει απειροστό πάχος dx' και διαρρέεται από ρεύμα έντασης $dI = J dx'$. Το μαγνητικό πεδίο σε τυχαίο σημείο x του άξονα, θα προκύψει ως το άθροισμα των πεδίων από αυτούς τους

κυκλικούς αγωγούς που αποτελούν το μαγνήτη. Με βάση τη σχέση (1), το πεδίο που δημιουργεί ο μαγνήτης (α) πάνω στον άξονα είναι:

$$B_{\alpha}(x) = \frac{\mu_0 J R^2}{2} \int_{x_1-L/2}^{x_1+L/2} \frac{dx'}{[(x-x')^2 + R^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

και όμοια το πεδίο του (β):

$$B_{\beta}(x) = \frac{\mu_0 J R^2}{2} \int_{x_2-L/2}^{x_2+L/2} \frac{dx'}{[(x-x')^2 + R^2]^{\frac{3}{2}}}$$

Βήμα 2^ο. Έχοντας υπολογίσει το μαγνητικό πεδίο των δύο μαγνητών (πηνίων), θα προσδιοριστεί η δυναμική ενέργεια αλληλεπίδρασής τους. Οι δύο μαγνήτες έλκονται λόγω του προσανατολισμού τους. Όπως και πριν, θεωρούμε ότι οι μαγνήτες αποτελούνται από μεγάλο πλήθος κυκλικών ρευματοφόρων αγωγών, έκαστος των οποίων έχει πάχος dx και διαρρέεται από ρεύμα $dI = J dx$. Κάθε στοιχειώδης αγωγός του μαγνήτη (β) δημιουργεί μια απειροστή μαγνητική ροπή $d\vec{\mu}_{\beta}$ μέτρου $d\mu_{\beta} = R^2 J dx$, η οποία βρίσκεται στο πεδίο του (α) και έχει δυναμική ενέργεια $dU(x) = -\vec{B}_{\alpha}(x) \cdot d\vec{\mu}_{\beta}$. Αυτό ισχύει εφ' όσον το πεδίο στη θέση x και στην επιφάνεια του ρευματοφόρου αγωγού, είναι ομογενές. Πράγμα που αληθεύει, προσεγγιστικά, αν η επιφάνεια του κυκλικού αγωγού είναι πολύ μικρή ή, ισοδύναμα, όταν η μεταξύ των μαγνητών απόσταση είναι μεγάλη συγκριτικά με την ακτίνα τους. Αθροίζοντας τις παραπάνω απειροστές ενέργειες βρίσκουμε τη δυναμική ενέργεια αλληλεπίδρασης των δύο μαγνητών, που θα εξαρτάται από τις θέσεις τους x_1 , x_2 και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους. (Στην έκφραση αυτή δεν συμπεριλαμβάνεται η δυναμική ενέργεια των μαγνητών λόγω της αλληλεπίδρασης με τον εαυτό τους, διότι αυτή θα συνεισφέρει με μια σταθερή ποσότητα ανεξάρτητη των x_1 και x_2 .)

$$U(x_1, x_2) = - \int_{x_2-L/2}^{x_2+L/2} B_{\alpha}(x) \pi R^2 J dx$$

Βήμα 3^ο. Οι μαγνητοστατικές δυνάμεις είναι συντηρητικές. Από τη δυναμική ενέργεια προκύπτει η ελκτική δύναμη:

$$F(x_0) = - \frac{dU}{dx_0} \cdot x_0 = x_1 - x_2$$

Οι παραπάνω ολοκληρώσεις υπολογίστηκαν αναλυτικά. Το τελικό αποτέλεσμα είναι:

$$F(x_0) = \frac{\mu_0 \mu^2}{2\pi R^2 L^2} \left(\frac{x_0-L}{\sqrt{R^2+(x_0-L)^2}} - \frac{2x_0}{\sqrt{R^2-x_0^2}} + \frac{x_0+L}{\sqrt{R^2+(x_0+L)^2}} \right) \quad (3)$$

Όπου $\mu = \pi R^2 L J$ η μαγνητική ροπή των μαγνητών, μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού στο εσωτερικό του πηνίου ($10^{-7} \text{T}^* \text{m/A}$ η τιμή του κενού και $6000 \text{T}^* \text{m/A}$ η τιμή του σιδήρου).

Η δύναμη εξαρτάται από την απόσταση χ_0 μεταξύ των μέσων των μαγνητών. Γίνεται απολύτως μέγιστη για $\chi_0 = L$, οπότε οι μαγνήτες έρχονται σε επαφή και τείνει στο μηδέν καθώς $\chi_0 \rightarrow \infty$ [4].

2.4 Γραμμική εξίσωση μαγνητικής δύναμης

Η γραμμικοποίηση της Εξίσωσης (3) έγινε με την μέθοδο Taylor και ο υπολογισμός της προέκυψε με τη βοήθεια της MATLAB. Αναλυτικά φαίνεται στο Σχήμα 6.

```

1 - clc;
2 - clear all;
3
4 - syms x m0 m R L
5 - f=((m0*m^2)/(2*pi*R^2*L^2))*(((x-L)/(sqrt(R^2+(x-L)^2)))-((2*x)/(sqrt(R^2+x^2)))+(x+L)/(sqrt(R^2+(x+L)^2))));
6 - t=taylor(f,x,0,'Order',2)
7 - pretty(t)
8
9
10

```

Command Window

New to MATLAB? See resources for [Getting Started](#).

τ =

$$-(m^2 \mu_0 x^2 (2/(R^2)^{1/2} - 2/(L^2 + R^2)^{1/2} + (2L^2)/(L^2 + R^2)^{3/2})) / (2 \pi L^2 R^2)$$

$$\frac{\mu_0 m^2 x^2}{2 \pi L^2 R^2} \left(\frac{2}{\sqrt{R^2}} - \frac{2}{\sqrt{L^2 + R^2}} + \frac{2L^2}{(L^2 + R^2)^{3/2}} \right)$$

Σχήμα 6. Περιβάλλον της MATLAB με τις εντολές και το αποτέλεσμα

$$t = - \frac{\left(\frac{2}{R} - \frac{2}{\sqrt{L^2 + R^2}} + \frac{2L^2}{(L^2 + R^2)^{3/2}} \right)}{2\pi L^2 R^2} \mu_0 \mu \chi \quad (4)$$

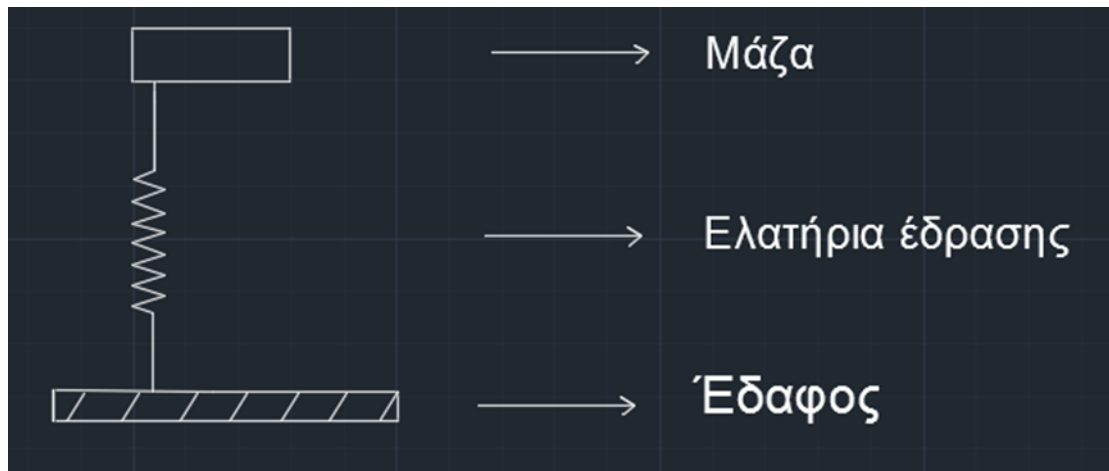
Κεφάλαιο 3

3.1 Δυναμικό σύστημα

Στο φυσικό κόσμο, ο όρος του δυναμικού συστήματος περιγράφει κάθε φυσικό φαινόμενο που εξελίσσεται με το χρόνο. Ένα φυσικό σύστημα μπορεί να περιγραφεί από ένα σύνολο μεταβλητών, οπότε το δυναμικό σύστημα είναι ένα σύστημα στο οποίο μία ή περισσότερες μεταβλητές μεταβάλλονται με το χρόνο. Τα περισσότερα φαινόμενα που συμβαίνουν στη φύση επηρεάζονται από το χρόνο οπότε η μελέτη των δυναμικών συστημάτων είναι πολύ σημαντική.

Ο αριθμός των εξισώσεων που περιγράφει το σύστημα επαρκώς, ονομάζεται βαθμός ελευθερίας.

Η μοντελοποίηση των δυναμικών συστημάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 7 και έγινε σε περιβάλλον AutoCAD 2016.



Σχήμα 7. Μοντελοποίηση δυναμικών συστημάτων

Η μάζα είναι ελαστικά εδρασμένη στο έδαφος. Η σταθερά έδρασης ορίζεται ως k . Ανάλογα με την δύναμη που ασκείται στην μάζα, προσδίδεται μια κατακόρυφη μετατόπιση στο σύστημα.

3.2 Ταλάντωση

Με τον όρο ταλάντωση χαρακτηρίζεται οποιαδήποτε παλινδρομική περιοδική μεταβολή οποιουδήποτε φυσικού μεγέθους γύρω από μία κεντρική τιμή. Με άλλα λόγια ταλάντωση είναι η αρμονική μεταβολή μεγέθους, γύρω από μία τιμή και η οποία επαναλαμβάνεται. Στη μηχανική ταλάντωση, μεταβάλλεται αρμονικά η θέση ενός σώματος γύρω από την θέση ισορροπίας του.

Φθίνουσα ή αποσβενύμενη ταλάντωση ονομάζεται η ταλάντωση κατά την οποία μειώνεται το πλάτος της ταλάντωσης. Η μείωση του πλάτους ονομάζεται απόσβεση.

3.3 Εξαναγκασμένη κίνηση – περιοδική διέγερση με δυνάμεις απόσβεσης

Πρόκειται για διέγερση, η οποία επαναλαμβάνεται χρονικά με πανομοιότυπο τρόπο. Σε αυτήν την κατηγορία, ο πλέον χαρακτηριστικός αντιπρόσωπος είναι η αρμονική διέγερση. Σε μια περιοδική ταλάντωση, η εξωτερική φόρτιση και η απόκριση επαναλαμβάνονται ανά συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, που λέγεται περίοδος T . Σημειώνεται ότι όλες οι περιοδικές διεγέρσεις είναι δυνατόν να αναχθούν σε αρμονικές διεγέρσεις αξιοποιώντας την ανάλυση Fourier.[5]

Κατά την περιοδική διέγερση το δυναμικό σύστημα ταλαντεύεται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$F(t) = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ \vdots \\ F_n(t) \end{Bmatrix} = f_c \cos \Omega t + f_s \sin \Omega t = \begin{Bmatrix} F_{c1}(t) \\ F_{c2}(t) \\ \vdots \\ F_{cn}(t) \end{Bmatrix} \cos \Omega t + \begin{Bmatrix} F_{s1}(t) \\ F_{s2}(t) \\ \vdots \\ F_{sn}(t) \end{Bmatrix} \sin \Omega t$$

Όπου F_c είναι η δύναμη απόσβεσης ενώ F_s είναι η δύναμη του ελατηρίου.

Η μόνιμη απόκριση του παραπάνω συστήματος εμφανίζεται όταν αποσβεστεί η μεταβατική απόκριση και είναι της μορφής της διέγερσης:

$$x(t) = \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{Bmatrix} = p_c \cos \Omega t + p_s \sin \Omega t = \begin{Bmatrix} P_{c1}(t) \\ P_{c2}(t) \\ \vdots \\ P_{cn}(t) \end{Bmatrix} \cos \Omega t + \begin{Bmatrix} P_{s1}(t) \\ P_{s2}(t) \\ \vdots \\ P_{sn}(t) \end{Bmatrix} \sin \Omega t$$

Όπου P_c και P_s είναι οι συντελεστές μόνιμης απόκρισης. Η εξίσωση μπορεί να γραφτεί $X(t) = P \cos \Omega t$ και όπου $P = \sqrt{P_c^2 + P_s^2}$.

Η μητρική μορφή των εξισώσεων συμπεριλαμβανομένων και των δυνάμεων απόσβεσης είναι:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad (5)$$

Όπου M είναι το μητρώο αδράνειας, K το μητρώο δυσκαμψίας C το μητρώο απόσβεσης:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & & C_{2n} \\ C_{31} & C_{23} & C_{33} & \dots & C_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & C_{n3} & & C_{nn} \end{bmatrix}$$

Έχοντας την μόνιμη απόκριση και τα μητρώα αδράνειας, δυσκαμψίας και απόσβεσης καθώς και την εξίσωση για την μόνιμη απόκριση η εξίσωση (5) μπορεί να γραφτεί:

$$-M\Omega^2(p_c \cos\Omega t + p_s \sin\Omega t) + C\Omega(p_s \cos\Omega t - p_c \sin\Omega t) + K(p_c \cos\Omega t + p_s \sin\Omega t) = f_c \cos\Omega t + f_s \sin\Omega t$$

Για να χρησιμοποιηθεί αντιστοιχία όρων θα χωριστούν οι συντελεστές $\cos\Omega t$ του και $\sin\Omega t$ όπως και στο δεύτερο μέρος της εξίσωσης.

$$(-M\Omega^2 p_c + C\Omega p_s + K p_c) \cos\Omega t + (-M\Omega^2 p_s - C\Omega p_c + K p_s) \sin\Omega t = f_c \cos\Omega t + f_s \sin\Omega t$$

Προκύπτουν λοιπόν οι παρακάτω εξισώσεις

$$-M\Omega^2 p_c + C\Omega p_s + K p_c = f_c$$

$$-M\Omega^2 p_s - C\Omega p_c + K p_s = f_s$$

Με τη χρήση μιγαδικών συναρτήσεων για τον υπολογισμό της μόνιμης απόκρισης χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση εισάγονται οι μιγαδικοί στην τελική εξίσωση κίνησης. Όπου υπάρχει αστερίσκος σημαίνει ότι είναι μιγαδικός αριθμός ενώ αντίστοιχα η παύλα υποδηλώνει συζυγή μιγαδικό αριθμό.

$$x(t) = P^* e^{(a+j\omega)t} + \overline{P^* e^{(a+j\omega)t}}$$

Όπου

$$P^* = P_r + jP_i \text{ και}$$

$$\overline{P^*} = \overline{P_r + jP_i}$$

$$x(t) = (P_r + jP_i) e^{(a+j\omega)t} + (P_r - jP_i) e^{(a+j\omega)t}$$

$$\begin{aligned}
 &= P_r e^{at} (e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}) + jP_i e^{at} (e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}) \\
 &= P_r e^{at} (\cos\omega t + j\sin\omega t + \cos\omega t - j\sin\omega t) + jP_i e^{at} (j\cos\omega t - \\
 &\sin\omega t - j\cos\omega t + \sin\omega t) \\
 &= e^{at} (2P_r \cos\omega t - 2P_i \sin\omega t) - e^{at} (P_r \cos\omega t + P_i \sin\omega t)
 \end{aligned}$$

Αντίστοιχα σε ένα σύστημα που επιδρά η αρμονική διέγερση μπορεί να εκφραστεί:

$$f(t) = f^* e^{j\Omega t} + \overline{f^* e^{j\Omega t}}$$

Και η μόνιμη λύση μπορεί να εκφραστεί:

$$\chi(t) = P^* e^{j\Omega t} + \overline{P^* e^{j\Omega t}}$$

Συνεπώς η εξίσωση κίνησης διαμορφώνεται:

$$\begin{aligned}
 &(-M\Omega^2 + jC\Omega + K) p^* e^{j\Omega t} + (-M\Omega^2 + jC\Omega + K) \overline{p^* e^{j\Omega t}} = f^* e^{j\Omega t} + \\
 &\overline{f^* e^{j\Omega t}} \Rightarrow (-M\Omega^2 + jC\Omega + K) p^* = f^*
 \end{aligned}$$

3.4 Ιδιοσυχνότητα

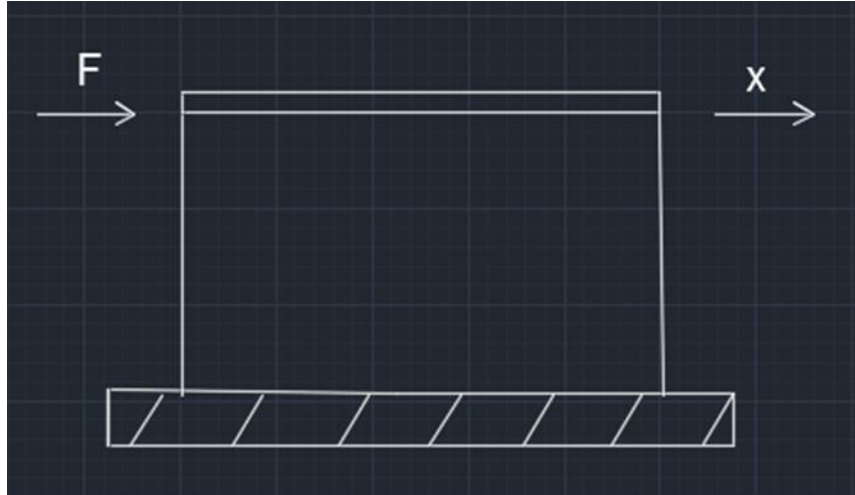
Η ποσότητα ω καλείται κυκλική ιδιοσυχνότητα ή κυκλική φυσική συχνότητα του δυναμικού συστήματος. Το τετράγωνο της ιδιοσυχνότητας ω ισούται με τον λόγο της σταθεράς του ελατηρίου προς τη μάζα. Η ιδιοσυχνότητα ω παριστάνει το σημείο της μέγιστης απορρόφησης ενέργειας (συντονισμός) του συστήματος. Καλείται, δε, φυσική συχνότητα (ή ιδιοσυχνότητα) διότι χαρακτηρίζει την συχνότητα ταλάντωσης του συστήματος, όταν δεν ασκούνται σε αυτό εξωτερικές διεγέρσεις (συχνότητα με την οποία το σύστημα «ταλαντώνεται από μόνο του», «ταλαντώνεται από τη φύση του»). Συνεπώς, η ιδιοσυχνότητα αποτελεί την πρώτη σημαντική ιδιότητα ενός δυναμικού συστήματος. Ένα σύστημα έχει τόσες ιδιοσυχνότητες όσους και βαθμούς ελευθερίας. Η ιδιοσυχνότητα ισούται με

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \text{ σε μονάδες rad/sec.}$$

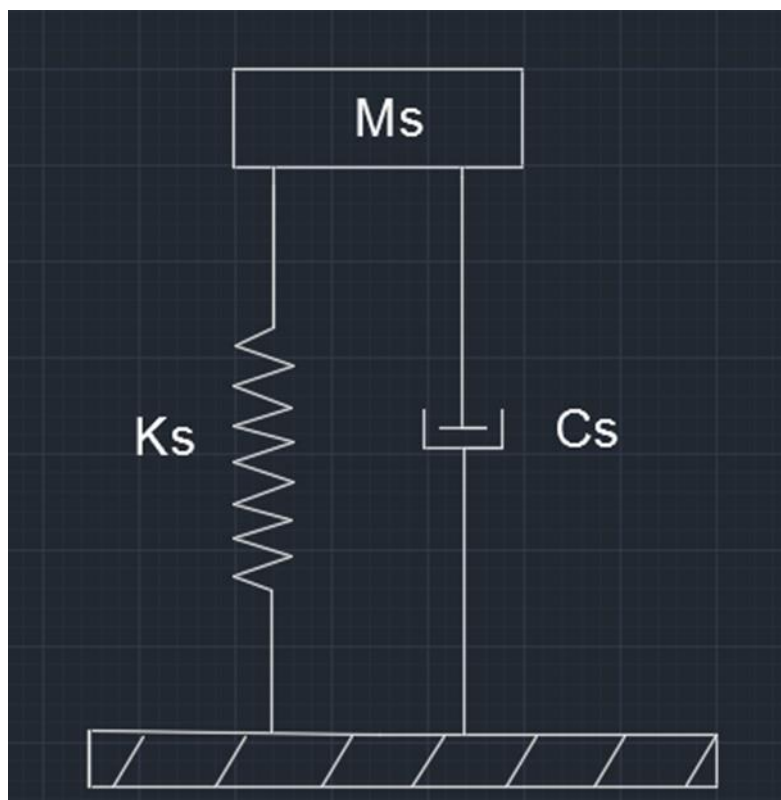
όπου k η σταθερά της ταλάντωσης και m η μάζα του σώματος που ταλαντώνεται.

3.5 Μοντελοποίηση δυναμικού μονοβάθμιου συστήματος

Το Σχήμα 8 παρουσιάζει ένα πλαίσιο το οποίο σχεδιάστηκε με σκοπό να μοντελοποιηθεί και να υποβληθεί σε διέγερση στο Κεφάλαιο 5.



Σχήμα 8. Πλαίσιο



Σχήμα 9. Μοντελοποίηση δυναμικού συστήματος με ένα βαθμό ελευθερίας

Στο Σχήμα 9 φαίνεται η μοντελοποίηση ενός δυναμικού συστήματος με ένα βαθμό ελευθερίας. Η δύναμη που ασκείται από το ελατήριο είναι $F_e = kx$ ενώ η δύναμη που ασκείται λόγω του βάρους είναι $F_w = ma = m\ddot{x}$. Το σύνολο των δυνάμεων που ασκούνται στο δυναμικό

σύστημα συμβολίζεται με F . Οι δυνάμεις τριβής Newton και Coulomb που ευθύνονται για την συνολική τριβή στο μηχανικό σύστημα. Συνεπώς θα πρέπει στην εξίσωση να ληφθεί υπ' όψιν η απόσβεση που δημιουργούν αυτές οι δυνάμεις.

Ένας τρόπος υπολογισμού του μητρώου απόσβεσης C , όχι όμως και ο μοναδικός, είναι η προσέγγιση κατά Rayleigh, σύμφωνα με την οποία ισχύει:

$$C = \beta_1(\Omega)M + \beta_2(\Omega)K$$

όπου M και K είναι η μάζα και η δυσκαμψία αντίστοιχα. Οι συντελεστές β_1 και β_2 ονομάζονται συντελεστές αναλογίας τύπου Rayleigh, οι τιμές των οποίων λαμβάνονται από πειραματικά δεδομένα (δηλαδή από μέτρηση της απόκρισης πραγματικών κατασκευών). Με άλλα λόγια, το μητρώο απόσβεσης C προσεγγίζεται ως γραμμικός συνδυασμός των μητρώων μάζας M και δυσκαμψίας K . Ισοδύναμα, το μητρώο απόσβεσης C θεωρείται ως μία αναλογία μεταξύ των μητρώων μάζας M και δυσκαμψίας K .

Στους συντελεστές αυτούς, θα δοθεί η τιμή 0,01 η οποία δίνεται συνήθως για ευκολία σε διάφορες μελέτες. Έτσι προκύπτει:

$$C = 0.01M + 0.01K$$

Άρα η εξίσωση κίνησης είναι:

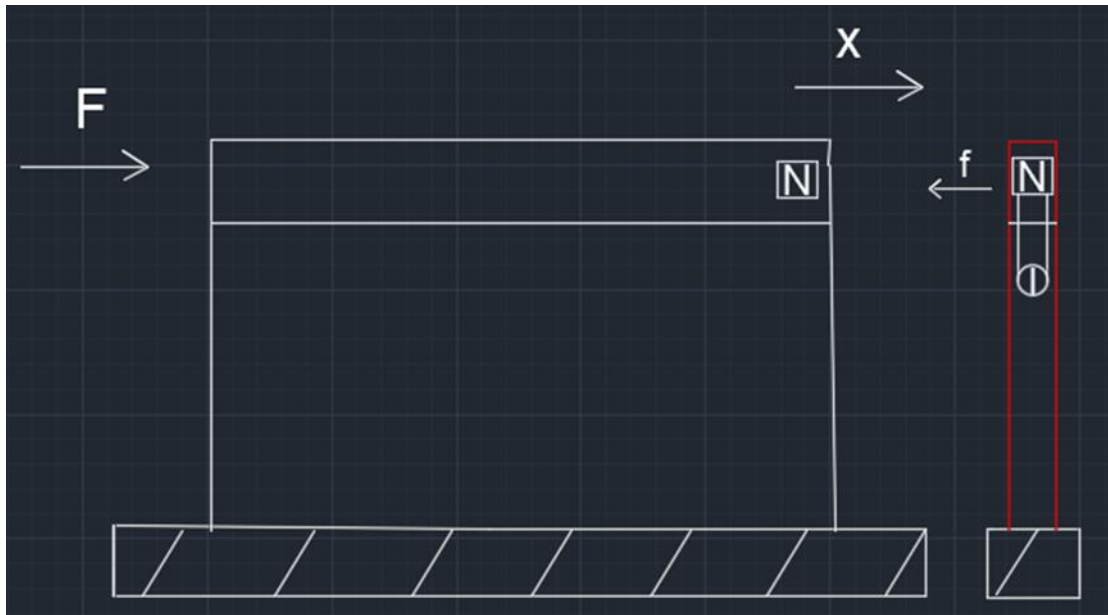
$$F = M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx$$

$$F = M\ddot{x} + (0.01M + 0.01K)\dot{x} + Kx$$

Κεφάλαιο 4

4.1 Περιγραφή ηλεκτρομαγνητικού συστήματος

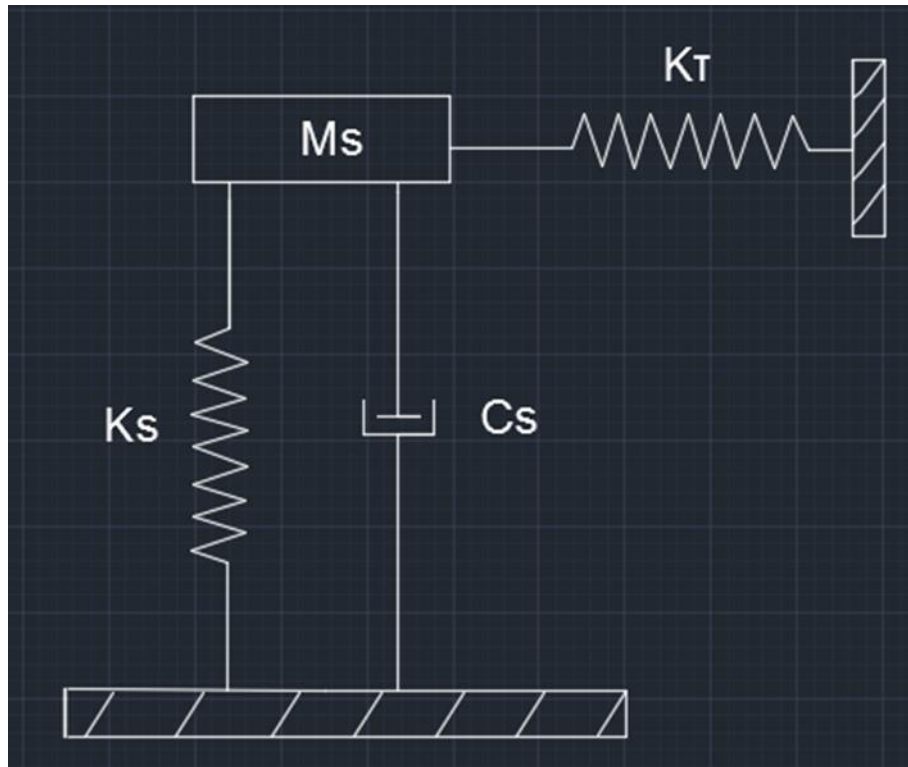
Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει περιγραφή του ηλεκτρομαγνητικού συστήματος αντισεισμικής μόνωσης καθώς επίσης και η μοντελοποίησή του.



Σχήμα 10. Πλαίσιο με ηλεκτρομαγνητικό σύστημα

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται ένα πλαίσιο ενός βαθμού ελευθερίας και δίπλα του μια άκαμπτη κολώνα. Στην κορυφή του πλαισίου είναι εφαρμοσμένος ένας μαγνήτης παράλληλα στην ακμή του με προσανατολισμό έστω του βόρειου μαγνητικού πόλου προς την κολώνα. Στην κορυφή της κολώνας αντίστοιχα είναι εφαρμοσμένο ένα πηνίο συνδεδεμένο με πηγή ρεύματος έτσι ώστε δίνοντας τάση δημιουργείται αντίρροπο μαγνητικό πεδίο ανάμεσα στο πλαίσιο και στην κολώνα, έντασης ανάλογης του ρεύματος. Με τον τρόπο αυτό αναπτύσσεται δύναμη f αντιστεκόμενη στην δύναμη F . Στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5) θα μελετηθεί κατά πόσο μπορεί να γίνει απόσβεση και να μειωθεί η μετατόπιση εφαρμόζοντας αυτό το σύστημα αναλυτικότερα.

4.2 Μοντελοποίηση του συστήματος



Σχήμα 11. Μοντελοποίηση του δυναμικού συστήματος με το ηλεκτρομαγνητικό σύστημα

Εξίσωση κίνησης:

$$F = M\ddot{x} + C\dot{x} + (Kx + K_T)$$

Κεφάλαιο 5

5.1 Matlab

Η γλώσσα προγραμματισμού στην συγκεκριμένη εργασία για την εξαγωγή των αποκρίσεων και διαγραμμάτων είναι η Matlab. Η γλώσσα Matlab ανήκει στην κατηγορία ειδικών εφαρμογών.

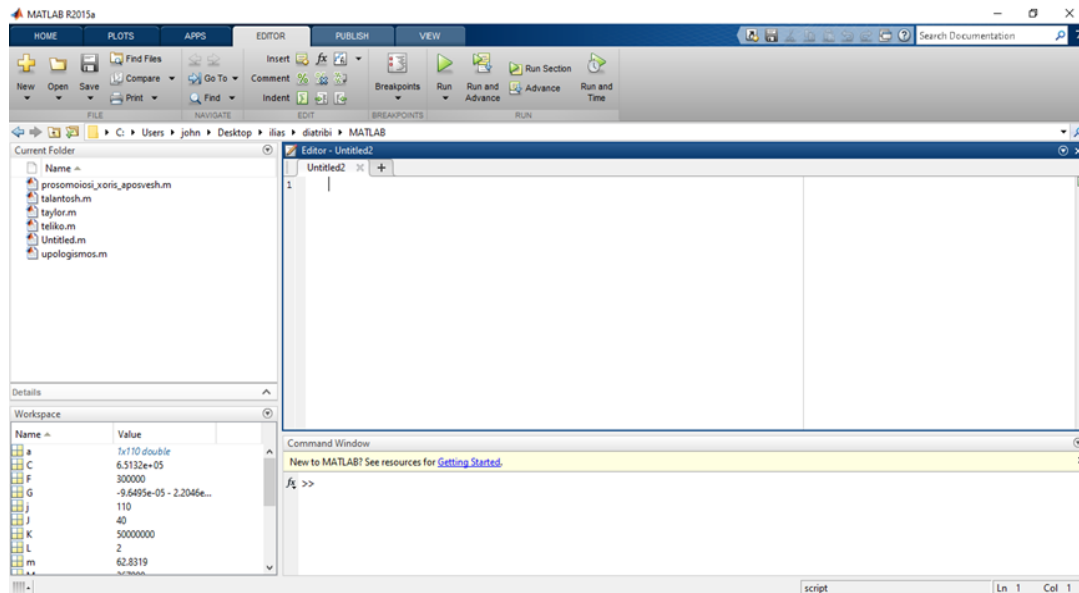
Η MATLAB λειτουργεί ως διερμηνέας εντολών (command interpreter), οι οποίες δίνονται μέσω του παραθύρου εντολών (command window). Οι εντολές αυτές μπορεί να είναι:

- Ορισμοί μεταβλητών και πράξεις
- Κλήση ενσωματωμένων συναρτήσεων (built-in functions) και των εγκατεστημένων εργαλειοθηκών (toolboxes).
- Κλήση συναρτήσεων (functions) ή αρχείων εντολών (Matlab-scripts) που κατασκευάζονται από τους χρήστες με μορφή m-file.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η Matlab R2015a (Σχήμα 12).

5.2 Ταλάντωση χωρίς τη χρήση ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων

Αρχικά εισήχθησαν στη Matlab η μάζα($N*m$), η δυσκαμψία($N*m^2$), η απόσβεση και η διέγερση(N) (οι αριθμοί αυτοί είναι από πραγματικά πειράματα).



Σχήμα 12. Το περιβάλλον της Matlab-αρχική σελίδα

```

1 -   clc;
2 -   clear all;
3 -   close all;
4
5 -   % Maza N*m
6 -   M=2.67*10^5;
7
8 -   % Dyskampsia N/m^2
9 -   K=5*10^7;
10
11 -  % Aposvesi
12 -  C=0.01*M+0.01*K;
13
14 -  % Diegersh N
15 -  F=3*10^5;
    
```

Σχήμα 13. Εντολές στη Matlab

Στη συνέχεια, προκειμένου να εξαχθούν το ιδιοδιάνυσμα και η ιδιοτιμή θα χρησιμοποιηθεί η εντολή `[vec,val]=eig(k)` και με την εντολή `w1=sqrt(val)` θα εξαχθεί η ιδιοσυχνότητα(rad/sec).

```

16
17 % Idiotimi, idiodianysma
18 - [vec, val]=eig(K,M);
19
20 % Omega einai iso w1
21 - omega=sqrt(K/M);
22 - w1=sqrt(val);

```

val	187.2659
vec	0.0019
w1	13.6845

Σχήμα 14. Εντολές στη Matlab

Για το διάγραμμα μετατόπισης (m) / ιδιοσυχνότητας θα δημιουργηθεί ένα εύρος ιδιοσυχνοτήτων από το 0 έως την τετραπλάσια τιμή της w1 (Σχήμα 15).

```

24 % Euros idiosyxnothton w apo to 0 eos to 4plasio tou w1
25 - w=[0:1:4*w1];

```

Σχήμα 15. Εντολές στη Matlab

Στη συνέχεια θα δημιουργηθεί μια λούπα μέσω της εξίσωσης κίνησης για να βρεθούν οι μετακινήσεις x (Σχήμα 16).

```

27 - for j=1:length(w)
28 -     G=[];
29 -     G=mldivide((( -M*(w(j)^2)+(i*w(j)*C+K)),F);
30 -     x(j)=abs(real(G).^2+imag(G).^2);
31 - end

```

Σχήμα 16. Εντολές στη Matlab

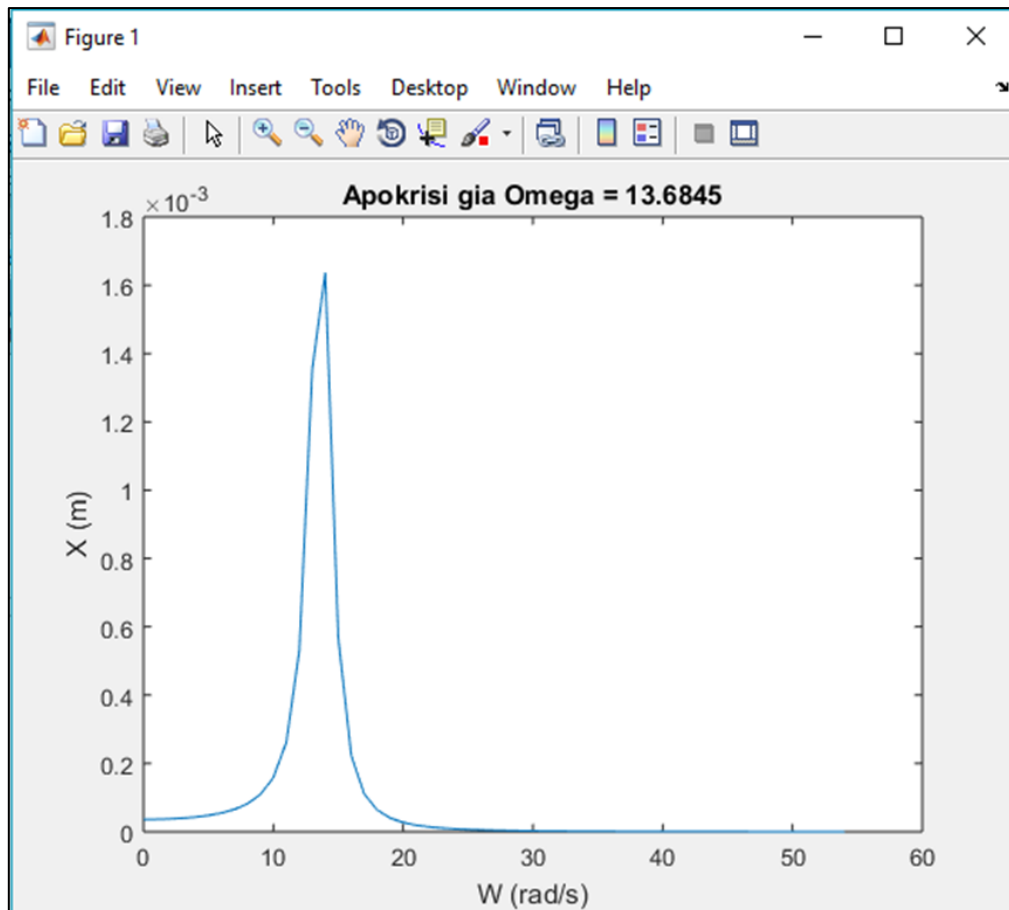
```

32 - plot(w,x)
33 - title(['Apokrisi gia Omega = ', num2str(w1)])
34 - ylabel('X (m)')
35 - xlabel('W (rad/s)')

```

Σχήμα 17. Εντολές στη Matlab

Και τέλος το διάγραμμα (Σχήμα 18) το οποίο προέκυψε από τις παραπάνω εντολές.(Σχήμα 17).



Σχήμα 18. Γραφική παράσταση στη MATLAB

Στη γραφική παράσταση (Σχήμα 18) απεικονίζεται η μετατόπιση του πλαισίου στο εύρος των ιδιοσυχνοτήτων για την συγκεκριμένη διέγερση. Η μέγιστη μετατόπιση είναι για την τιμή $\omega_1=13.6845$ και είναι $\chi=0,0016\text{m}$

5.3 Ταλάντωση με χρήση ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων

Σε αυτή την ενότητα θα εξεταστεί η συμπεριφορά του συστήματος υποβάλλοντάς το στην συγκεκριμένη διέγερση, επεμβαίνοντας όμως σε αυτό με χρήση ηλεκτρομαγνητικής δύναμης. Τα αρχικά δεδομένα της Matlab παραμένουν ως έχουν. Θα εισαχθούν δεδομένα για το ηλεκτρομαγνητικό σύστημα, όπως το ρεύμα (A), η μαγνητική διαπερατότητα του σιδήρου (T^*m/A), η μαγνητική ροπή, η ακτίνα πηνίου (m) και το μήκος του πηνίου(m) (Σχήμα 19).

```

14      % Aktina phniou m
15      R=0.5;
16
17      % Mhkos phniou m
18      L=2;
19
20      % Reuma A
21      J=40;
22
23      % Magnitikh diaperatotita sidirou T*m/A
24      mo=6000;
25
26      % Magnitikh ropi
27      m=pi*R^2*L*J;
```

Σχήμα 19. Εντολές στη Matlab

Στη συνέχεια εισάγεται υπό μορφή κώδικα η γραμμική εξίσωση δύναμης του μαγνητικού πεδίου (Σχήμα 20).

```

28
29      % grammiki eksisosi dynamis magnitikou pediou
30      t =(m^2*mo*(2/(R^2)^(1/2) - 2/(L^2 + R^2)^(1/2) + (2*L^2)/(L^2 + R^2)^(3/2)))/(2*L^2*pi*R^2);
31
```

Σχήμα 20. Εντολές στη Matlab

Για να εξαχθούν τα ιδιοδιανύσματα και οι ιδιοτιμές η εργασία είναι η ίδια με την διαφορά ότι στην ιδιοσυχνότητα συμπεριλαμβάνεται και η t (Σχήμα 21).

```

35      % Idiosyxnothta arxikou systhmatos
36      w1=sqrt(val) ;
37      % Idiosyxnothta proteinomenou systhmatos
38      omega=sqrt ( (K+t) /M) ;
```

Σχήμα 21. Εντολές στη Matlab

Με την εξίσωση κίνησης (με την προσθήκη της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης) δημιουργήθηκε πάλι η ίδια λούπα για την εξαγωγή του τελικού διαγράμματος μετακινήσεων. Το εύρος των ιδιοσυχνοτήτων εδώ χωρίστηκε από το 0 έως την 8πλάσια τιμή της w_1 για μεγαλύτερη σαφήνεια (Σχήμα 22).

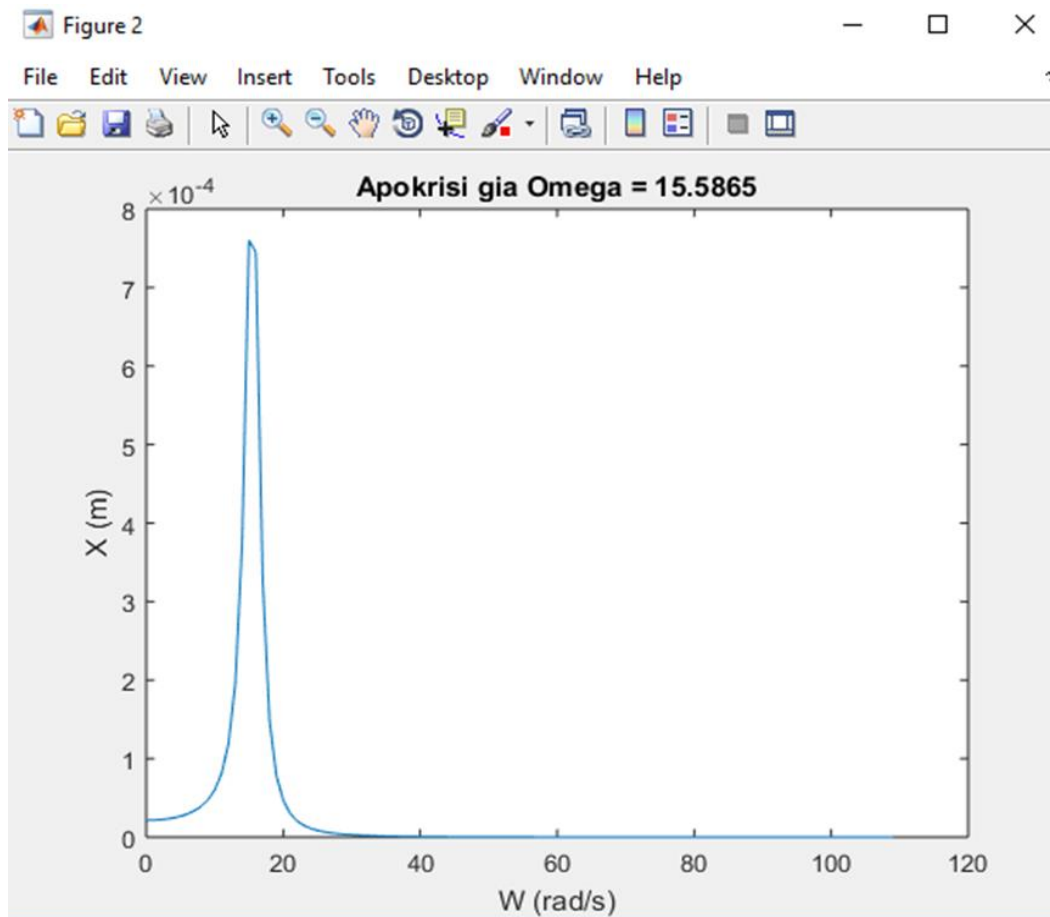
```
51 % Euros idiosyxnouthton w apo to 0 eos to 8plasio tou w1
52 - w2=[0:1:8*w1];
53 % Aposvesi
54 - C=0.01*M+0.01*(K+t);
55 - for j=1:length(w2)
56 -     G=[];
57 -     G=mldivide((( -M*(w2(j)^2)))+(i*w2(j)*C+K+t)),F);
58 -     a(j)=abs(real(G).^2+imag(G).^2);
59 - end
```

Σχήμα 22. Εντολές στη Matlab

Για τη δημιουργία του διαγράμματος οι εξής εντολές (Σχήμα 23):

```
66 - figure;
67 - plot(w2,a)
68 - title(['Apokrisi gia Omega = ', num2str(omega)])
69 - ylabel('X (m)')
70 - xlabel('W (rad/s)')
```

Σχήμα 23. Εντολές στη Matlab



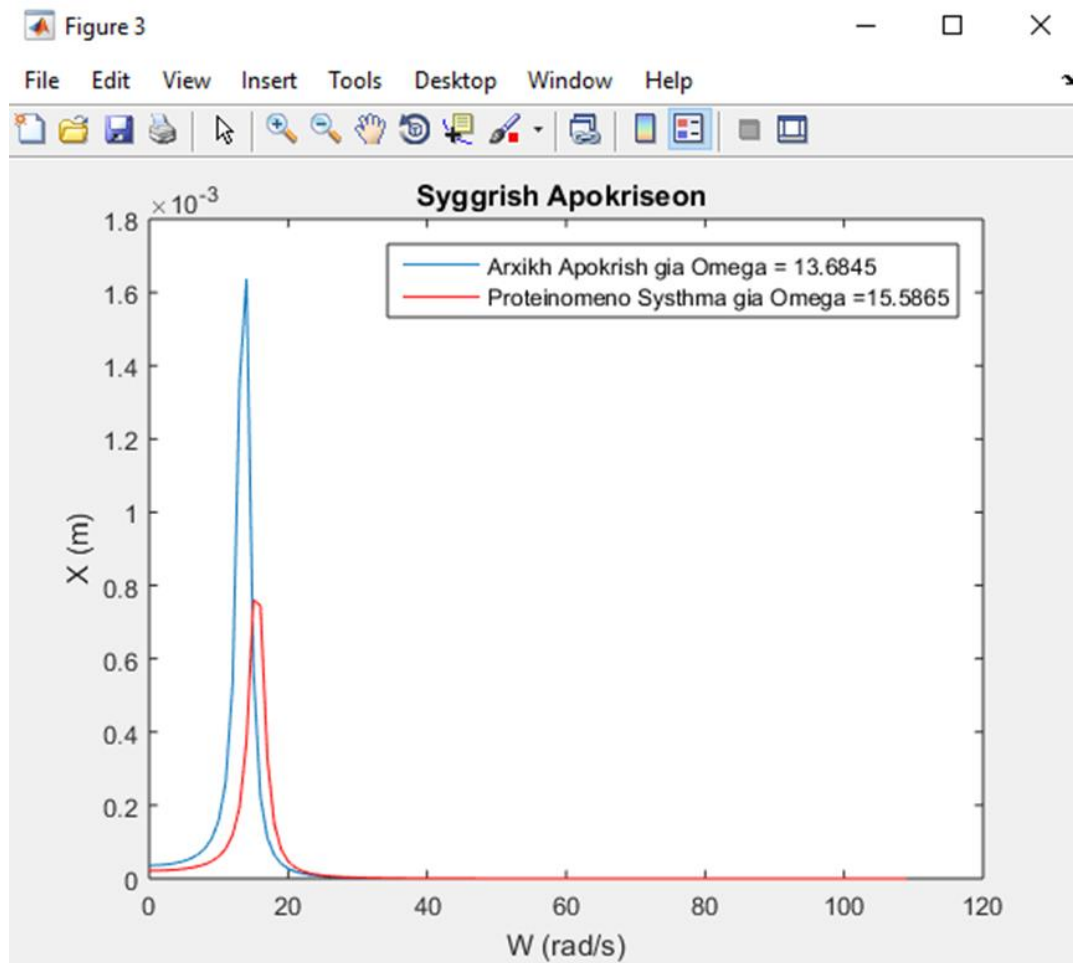
Σχήμα 24. Γραφική παράσταση στη Matlab

Παρατηρείται σημαντική μείωση της μετατόπισης $\chi=0,00076022\text{m}$ με μεγαλύτερη όμως ιδιοσυχνότητα $\omega_2=15.5865$.

Σε αυτό το σημείο θα παρατεθούν μέσω των ίδιων αξόνων σε κάθε θέση και τα δυο διαγράμματα (Σχήμα 26) για να είναι ευκολότερη η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις εξής εντολές (Σχήμα 25):

```
72 - figure;
73 - plot(w,x)
74 - hold on
75 - plot(w2,a,'r')
76 - legend(['Arxikh Apokrish gia Omega = ', num2str(w1)], ['Proteinomeno Systhma gia Omega = ', num2str(omega)])
77 - title(['Syggrish Apokriseon '])
78 - ylabel('X (m)')
79 - xlabel('W (rad/s)')
```

Σχήμα 25. Εντολές στη Matlab



Σχήμα 26. Γραφική παράσταση στη Matlab

5.4 Παραδείγματα με αλλαγή δεδομένων του ηλεκτρομαγνητικού συστήματος

Όπως είναι εμφανές η βάση για να την σωστή λειτουργία του ηλεκτρομαγνητικού αυτού συστήματος είναι κατά κύριο λόγο η ένταση του ρεύματος που τροφοδοτείται το πηνίο και κατά δεύτερον η γεωμετρία του πηνίου, δηλαδή η ακτίνα και το μήκος του. Παρατίθενται παρακάτω κάποια παραδείγματα με αλλαγή αυτών των τριών παραμέτρων.

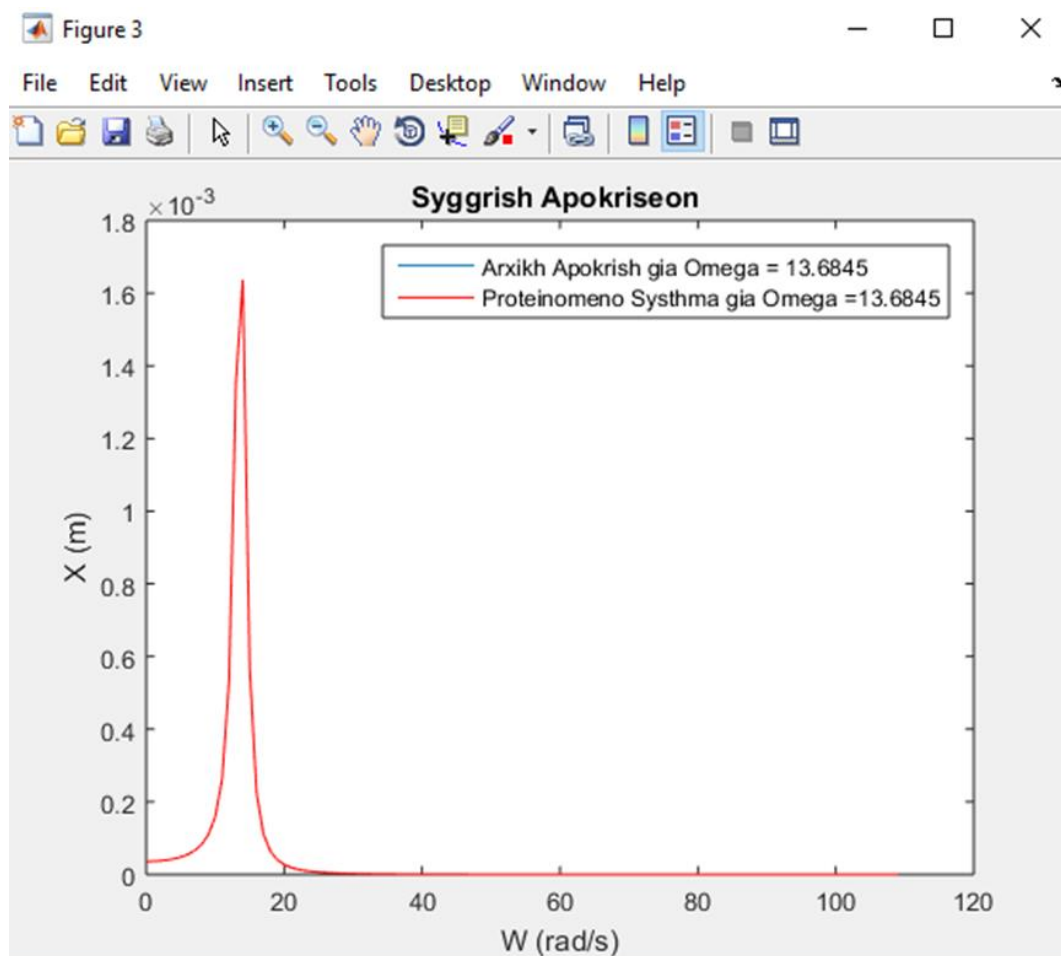
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

```

14      % Aktina phniou m
15      R=0.5;
16
17      % Mhkos phniou m
18      L=2;
19
20      % Reuma A
21      J=0;
    
```

Σχήμα 27. Εντολές στη Matlab

Η ακραία περίπτωση στην οποία το σύστημα τροφοδοτείται με μηδέν ρεύμα (Σχήμα 27).



Σχήμα 28. Γραφική παράσταση στη Matlab

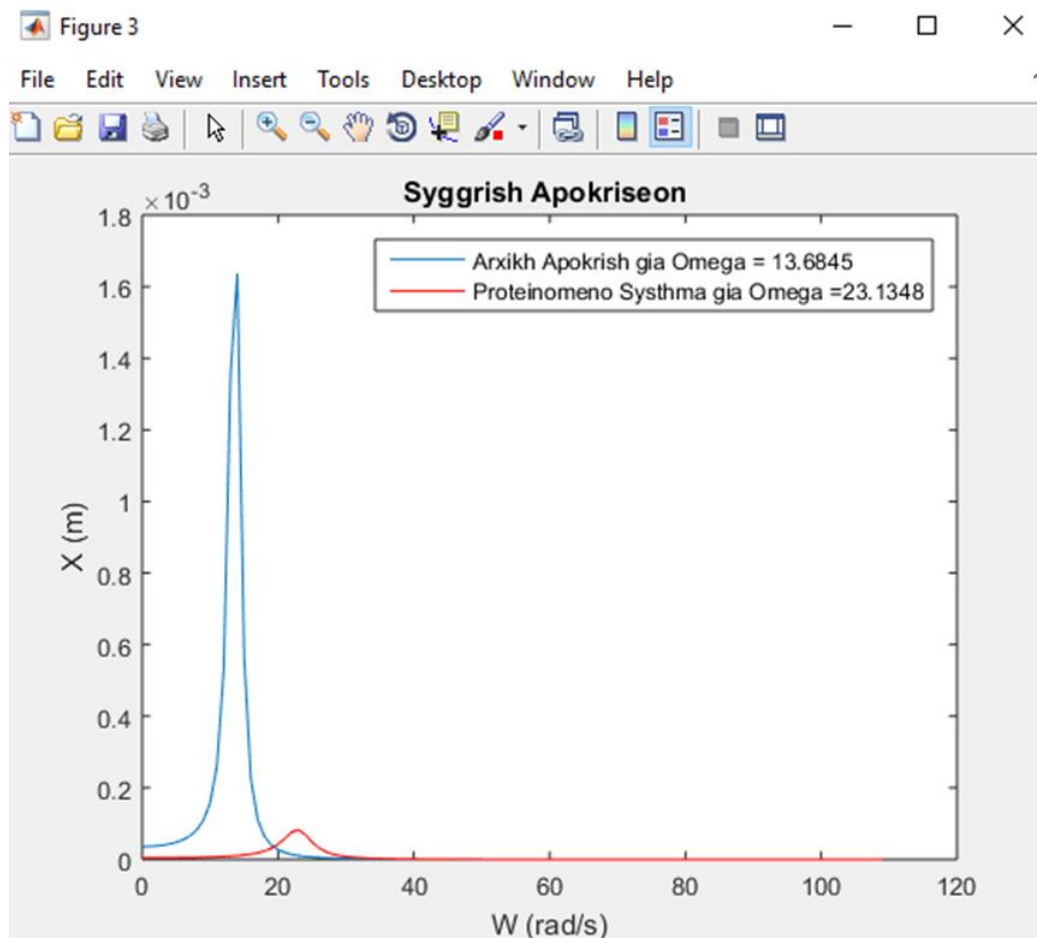
Πράγματι όπως ήταν αναμενόμενο η μετατόπιση παραμένει ίδια. Τα δύο διαγράμματα συμπίπτουν (Σχήμα 28).

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2

```
14 % Aktina phniou m  
15 - R=0.5;  
16  
17 % Mhkos phniou m  
18 - L=2;  
19  
20 % Reuma A  
21 - J=100;
```

Σχήμα 29. Εντολές στη Matlab

Επίσης μια ακραία περίπτωση με μεγάλη ένταση ρεύματος (Σχήμα 29).



Σχήμα 30. Γραφική παράσταση στη Matlab

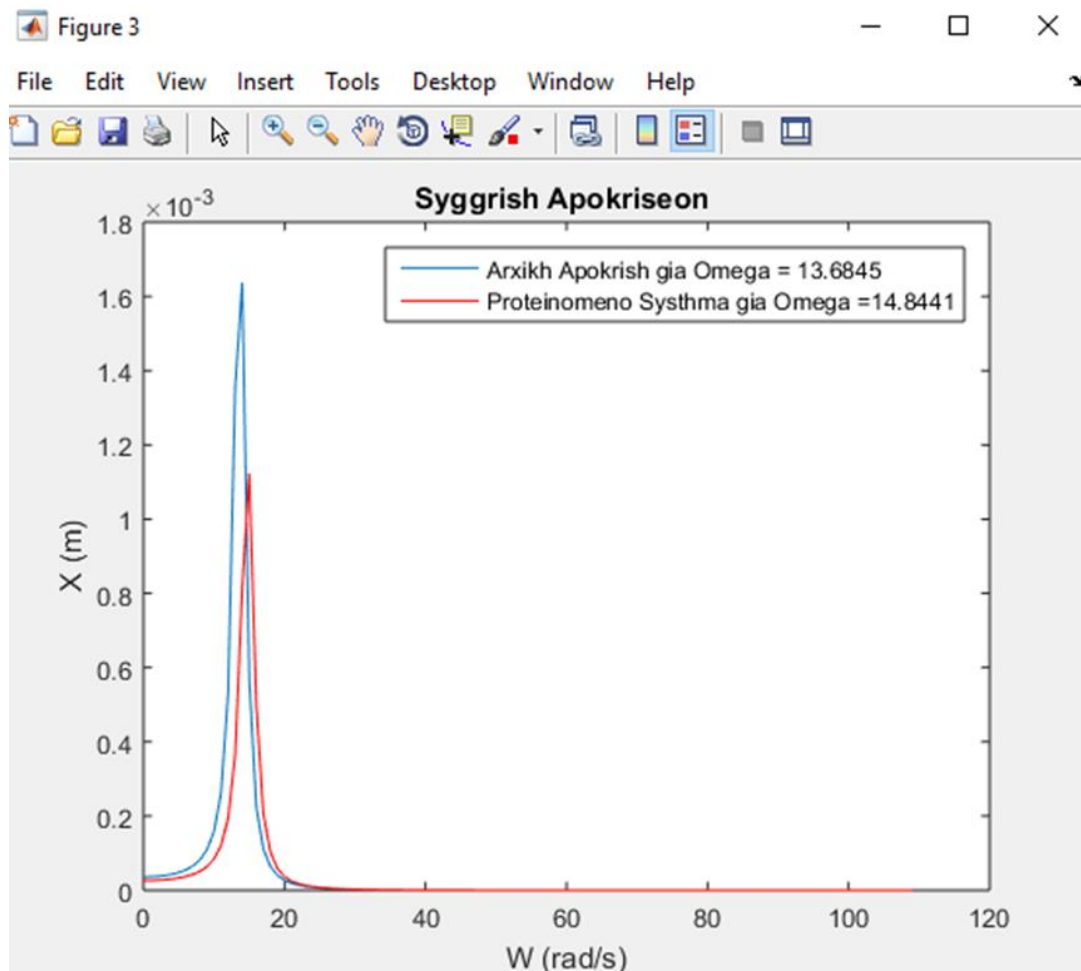
Φαίνεται ότι η μετατόπιση τείνει προς το μηδέν. Εάν δε αυξηθεί και άλλο η ένταση του ρεύματος η μετατόπιση θα μηδενιστεί εντελώς (Σχήμα 30).

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3

```
14      % Aktina phniou m  
15 -    R=0.3;  
16  
17      % Mhkos phniou m  
18 -    L=1;  
19  
20      % Reuma A  
21 -    J=40;
```

Σχήμα 31. Εντολές στη Matlab

Σε αυτό το παράδειγμα άλλαξε η γεωμετρία του πηνίου. Μειώθηκαν και η ακτίνα και το μήκος του (Σχήμα 31).



Σχήμα 32. Γραφική παράσταση στη Matlab

Η μετατόπιση ελαττώνεται αλλά είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτήν των αρχικών δεδομένων (Σχήμα 32).

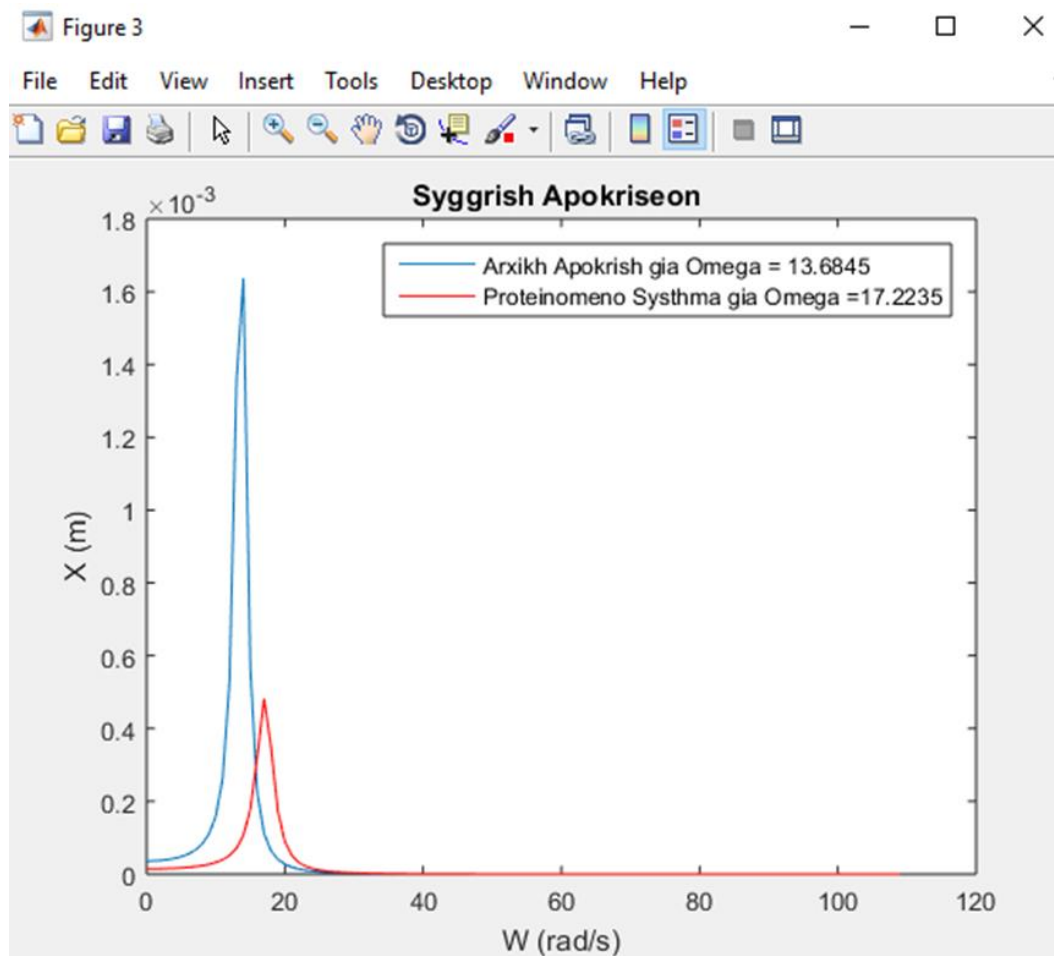
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4

```

14 % Aktina phniou m
15 - R=1;
16
17 % Mhkos phniou m
18 - L=3;
19
20 % Reuma A
21 - J=40;
    
```

Σχήμα 33. Εντολές στη Matlab

Όπως και πριν άλλαξε και εδώ η γεωμετρία του πηνίου με την διαφορά ότι αυξήθηκαν και η ακτίνα και το μήκος του (Σχήμα 33).



Σχήμα 34. Γραφική παράσταση στη Matlab

Σε αυτήν την περίπτωση η μετατόπιση μειώθηκε σημαντικά (Σχήμα 34).

Συμπεράσματα

Η πρωταρχική ιδέα, ήταν πως θα μπορούσε ο ηλεκτρομαγνητισμός να έχει επίδραση στην απόσβεση ενός σεισμού. Ύστερα από διάφορες προτάσεις, προτείνεται η εν λόγω μεθοδολογία στη οποία εξετάστηκε η συμπεριφορά της κατασκευής και του ηλεκτρομαγνητικού συστήματος υποβάλλοντας σε αυτήν συγκεκριμένη διέγερση σε ένα εύρος ιδιοσυχνοτήτων. Τα αποτελέσματα είναι παραπάνω από ικανοποιητικά όπως αυτά προέκυψαν από τα παραδείγματα που μελετήθηκαν. Η βέλτιστη και οικονομικότερη λύση, τουλάχιστον σε θεωρητικό επίπεδο, για να επιτευχθεί μεγαλύτερη μείωση της μετατόπισης είναι να μεγαλώσουν τα χαρακτηριστικά του πηνίου έτσι ώστε να καταναλώνεται λιγότερο ρεύμα.

Η μεταπτυχιακή αυτή διατριβή, είναι ένα πρωταρχικό στάδιο για την απόσβεση των δυνάμεων του σεισμού με χρήση ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων. Η μελέτη περιορίστηκε σε ένα δυναμικό σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας και σε μια συγκεκριμένη διέγερση, όπως επίσης συγκεκριμένη ήταν και αντιστεκόμενη δύναμη από τους ηλεκτρομαγνήτες. Μια μελλοντική βλέψη είναι να μελετηθεί αυτή η ιδέα εις βάθος, δηλαδή σε ένα δυναμικό σύστημα περισσότερων βαθμών ελευθερίας, διεγείροντας το σε μεταβαλλόμενες δυνάμεις μια χρονικής σειράς, προσεγγίζοντας έτσι περισσότερο την πραγματικότητα. Και επειδή θεωρία και πράξη συνδέονται άμεσα, ταυτόχρονα όμως απέχουν, ένα πείραμα σε μικροκλίμακα θα ήταν αντικείμενο μελέτης που θα οδηγούσε σε πιο ξεκάθαρα συμπεράσματα είτε θετικά είτε αρνητικά είτε και τα δυο.

Βιβλιογραφία

- [1] www.oasp.gr (οργανισμός αντισεισμικού σχεδιασμού και προστασίας)
- [2] www.slideshare.net
- [3] Τουλιάτος Π., *Αρχιτεκτονική και Σεισμός*, Σημειώσεις για το κατ' επιλογήν μάθημα 6ου εξαμήνου Ε.Μ.Π.
- [4] Young D. Hugh, *Πανεπιστημιακή φυσική*. Δεύτερος τόμος Ηλεκτρομαγνητισμός Οπτική Σύγχρονη Φυσική, Εκδόσεις Παπαζήση (2010).
- [5] Κάναρχος Α, Αντωνιάδης Ι., *Δυναμική μηχανών*. Αθήνα, Εκδόσεις Παπασωτηρίου (1998).
- [6] Anil K. Chopra, *Δυναμική των κατασκευών – Θεωρία και εφαρμογές στη σεισμική μηχανική*. Τρίτη έκδοση, Εκδόσεις Μ. Γκιουρδας, (2010).

Παράρτημα Α

ΚΩΔΙΚΑΣ

```
clc;
clear all;
close all;

% Maza N*m
M=2.67*10^5;

% Dyskampsia N/m^2
K=5*10^7;

% Diegersh N
F=3*10^5;

% Aktina phniou m
R=0.5;

% Mhkos phniou m
L=2;

% Reuma A
J=40;

% Magnitikh diaperatotita sidirou T*m/A
mo=6000;

% Magnitikh ropi
m=pi*R^2*L*J;

% grammiki eksisosi dynamis magnitikou pediou
t =(m^2*mo*(2/(R^2)^(1/2) - 2/(L^2 + R^2)^(1/2) + (2*L^2)/(L^2 +
R^2)^(3/2)))/(2*L^2*pi*R^2);

% Idiotimi, idiodianysma
[vec,val]=eig(K,M);

% Idiosyxnothta arxikou systhmatos
w1=sqrt(val);
% Idiosyxnothta proteinomenou systhmatos
omega=sqrt((K+t)/M);

% Euros idiosyxnothton w apo to 0 eos to 4plasio tou w1
w=[0:1:4*w1];

% Aposvesi
C=0.01*M+0.01*K;
for j=1:length(w)
    G=[];
    G=mldivide(((( -M*(w(j)^2)))+(i*w(j)*C+K))),F);
    x(j)=abs(real(G).^2+imag(G).^2);
end

% Euros idiosyxnothton w apo to 0 eos to 8plasio tou w1
```

```
w2=[0:1:8*w1];  
% Aposvesi  
C=0.01*M+0.01*(K+t);  
for j=1:length(w2)  
    G=[];  
    G=mldivide(((( -M*(w2(j)^2)))+(i*w2(j)*C+K+t)),F);  
    a(j)=abs(real(G).^2+imag(G).^2);  
end  
figure;  
plot(w,x)  
title(['Apokrisi gia Omega = ', num2str(w1)])  
ylabel('X (m)')  
xlabel('W (rad/s)')  
  
figure;  
plot(w2,a)  
title(['Apokrisi gia Omega = ', num2str(omega)])  
ylabel('X (m)')  
xlabel('W (rad/s)')  
  
figure;  
plot(w,x)  
hold on  
plot(w2,a,'r')  
legend(['Arxikh Apokrish gia Omega = ', num2str(w1)], ['Proteinomeno  
Systhma gia Omega =', num2str(omega)])  
title(['Syggrish Apokriseon '])  
ylabel('X (m)')  
xlabel('W (rad/s)')
```